# 不同杀菌方式和冻融循环对桑葚原浆品质的影响

陈晓霞[1,2]，邹波[2]，徐玉娟[2]，余元善[2]，程丽娜[2]，卜智斌[2]，胡腾根[2]，肖更生[1,2*]

（1.仲恺农业工程学院轻工食品学院，广东广州 510000）（2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业农村部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510640）

**摘要：**为研究不同杀菌方式和反复冻融对桑葚原浆品质的影响，本实验以未杀菌原浆（Unpasteurized Mulberry Pulp, Y）为对照，比较了巴氏杀菌（Pasteurization, TP）、超高压杀菌（High Pressure Processing, HPP）和 5 次冻融循环对桑葚原浆微生物、常规理化指标及花色苷和风味等特征指标的影响。结果表明: HPP 和 TP 均能有效杀灭桑葚浆中的霉菌和酵母菌（从 87 CFU/mL 降至未检出），对 pH 值、可溶性固形物含量和流变特性影响不大；其中 HPP 能更好保留风味和滋味，其鲜味比 TP 高 40.9%，平均粒径 $D_{4,3}$ 变幅小于 6%。反复冻融抑制了 Y 组和 TP 组微生物的生长。不同处理组均以第 1 次冻融品质变化最大，表现为总酸和 $b^*$ 值上升，$a^*$ 值和动、静态流变特性下降。随着冻融次数增加，总花色苷（含量 1.33~1.70 mg·g$^{-1}$）和总酚（11.35~12.53 mg GAE·g$^{-1}$）相对稳定；单体酚变化不规律。此外，反复冻融对香气和滋味也有一定影响。综上，HPP 能更好的保留桑葚原浆的品质，反复冻融对桑葚浆品质有不良影响，以第 1 次冻融影响最大，建议 TP 组冻融不超过 2 次，HPP 组不超过 3 次。本研究可为高品质桑葚原浆的生产和保藏提供理论依据。

**关键词：**桑葚原浆；巴氏杀菌；超高压杀菌；冻融循环；品质

**文章编号：**1673-9078(2026)10-217-229 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1185

# Effects of Different Sterilization Methods and Freeze-thaw Cycles on the Quality of Mulberry Pulp

**CHEN Xiaoxia[1,2], ZOU Bo[2], XU Yujuan[2], YU Yuanshan[2], CHENG Lina[2], BU Zhibin[2], HU Tenggen[2], XIAO Gengsheng[1,2*]**

(1.College of Food Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510000, China) (2.Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The effects of different sterilization methods and repeated freeze-thaw cycles on the quality of mulberry pulp were invesgtigated. Using unpasteurized mulberry pulp (Y) as the control in this experiment, the effects of pasteurization (TP), high-pressure processing (HPP), and five freeze-thaw cycles on the microbial content, conventional physicochemical indicators, anthocyanins, and flavor characteristics of mulberry pulp were compared. The results showed that both HPP and TP were effective in eliminating mold and yeast, with counts decreasing from 87 CFU/mL to undetectable levels, whereas only minor effects were observed on pH value, soluble solids content, and rheological properties. Among the treatments, HPP showed superior preservation of flavor and taste, exhibiting a 40.9% higher umami intensity than TP while limiting changes in the average particle size ($D_{4,3}$) to less than 6%. Repeated freeze-thaw cycles inhibited microbial growth in both the Y and TP groups. The most pronounced changes in quality were observed after the first freeze-thaw cycle across all groups, characterized by increases in total acid and $b^*$ value, and

收稿日期：2025-08-18；修回日期：2025-10-09；接受日期：2025-10-16

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2100802）；现代农业产业技术体系建设专项（CARS-18-ZJ0506）；广东省农产品加工技术研发中试公共服务平台升级建设项目（粤财农〔2024〕37 号）；广东省农业科学院人才培养项目（R2022PY-QY009）

作者简介：陈晓霞（1998-），女，硕士研究生，研究方向：食品加工与安全，E-mail：2517949010@qq.com

通迅作者：肖更生（1965-），男，研究员，研究方向：果蔬精深加工，E-mail：guoshuxgs@163.com

decrease in *a** value, and dynamic and static rheological properties. As the number of freeze-thaw cycles increased, the contents of total anthocyanin (1.33~1.70 mg·g$^{-1}$) and total phenols (11.35~12.53 mgGAE·g$^{-1}$) remained relatively stable, whereas variations in monomeric phenols were irregular. Furthermore, the aroma and taste were also affected to a certain extent by repeated freeze-thaw cycles. In conclusion, the quality of mulberry pulp was better preserved by HPP treatment. Repeated freeze-thaw cycles adversely affected pulp quality, with the greatest deterioration occurring during the first cycle. It is recommended that the TP and HPP groups should undergo no more than two and three freeze-thaw cycles, respectively. This study provides a theoretical foundation for the production and preservation of high-quality mulberry pulp.

**Key words:** mulberry pulp; pasteurization; high-pressure processing; freeze-thaw cycles; quality

引文格式：

陈晓霞,邹波,徐玉娟,等.不同杀菌方式和冻融循环对桑葚原浆品质的影响[J].现代食品科技,2026,42(10):217-229.

CHEN Xiaoxia, ZOU Bo, XU Yujuan, et al. Effects of different sterilization methods and freeze-thaw cycles on the quality of mulberry pulp [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 217-229.

桑葚（*Morus alba* L.）又名桑椹、桑果等，属于“药食同源”水果，含有多种维生素、矿物质等营养成分，以及花色苷、白藜芦醇和多糖等功能性成分，具有良好的抗氧化[1]、抗衰老[2]、降血糖[3]、降血脂[4]等作用。但桑果季节性强、供应期短，且采后呼吸作用强，果实柔软多汁，在储存和运输过程中极易发生腐败变质，造成资源浪费，限制了产业的可持续发展。加工是延长其产业链、提升产品附加值的重要途径。将整果打浆制成的桑葚原浆，不仅最大程度保留了果实的色、香、味，还保留了花色苷、维生素和多糖等活性成分[5]，是制备果汁、饮料、果酒和果醋等衍生制品的优质基料。

为延长果蔬原汁原浆的保质期，通常需要进行杀菌处理，现有杀菌方式有热杀菌和非热杀菌。巴氏杀菌是一种常见的热杀菌技术，杀菌温度通常低于 100 ℃，因其设备简单，成本较低，是工厂常用的热杀菌方式，但易造成色泽褐变、营养和风味破坏[6]。超高压杀菌是将密封于弹性容器内的食品置于水或其他液体作为传压介质的压力系统中，经 100~600 MPa 压力处理，在常温环境下达到杀菌目的，是目前商业化程度最高的食品非热加工技术，能很好保持食品的色泽、营养品质和风味[7]。冷冻也是能很好保存原料的一种加工方式，然而，速冻果蔬浆在反复冻融过程中存在品质劣变现象[4]，加之前期调研也发现，桑葚原浆经解冻－复冻后，品质与新鲜原浆有差异。目前，桑葚原浆反复冻融过程中的品质演变规律尚不清晰。

本研究系统比较了不杀菌、巴氏杀菌、超高压杀菌以及冻融循环（−18 ℃冷冻 3 d → 4 ℃解冻 20 h）对桑葚浆品质的影响，以期为高品质桑葚浆的生产和保藏提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

桑葚由广州宝桑园生态科技有限公司提供，经真空包装后于 −20 ℃贮藏。

平板计数琼脂（PCA）培养基、孟加拉红（虎红）琼脂培养基，广东环凯微生物科技有限公司；无水乙醇、无水甲醇、冰醋酸，天津市富宇精细化工有限公司；盐酸，广州化学试剂厂；氯化钠、醋酸钾、氯化钾、氢氧化钠、无水碳酸钠，福晨（天津）化学试剂有限公司；福林酚试剂，上海源叶生物科技有限公司；甲醇（色谱级）、乙腈（色谱级），天津市彪仕奇科技发展有限公司；甲酸，天津市科密欧化学试剂有限公司。

标准品：没食子酸、绿原酸和芦丁，成都钠钶锂生物科技有限公司；槲皮素 -3-*O*- 葡萄糖苷和矢车菊素 3-*O*- 芸香糖苷（Cyanidin 3-*O*-rutinoside，C-3-R），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；原儿茶酸、新绿原酸、咖啡酸、矢车菊素 3-*O*- 葡萄糖苷（Cyanidin-3-*O*-glucoside, C-3-G）和对香豆酸，上海源叶生物科技有限公司。

HWS-24 电热恒温水浴锅，上海一恒科学仪器有限公司；SHHP-57DZM-600 超高压设备，山西三水河科技股份有限公司；FE28 型 pH 计，梅特勒－托利多仪器（上海）有限公司；RFM3400 阿贝折光仪，英国 Stanley 公司；D3024R 台式高速冷冻离心机，美国赛洛捷克公司；UV-1900i 紫外可见分光光度计、LC-20AT 高效液相色谱仪，日本岛津有限公司；Ultra ScanVIS 全自动色差仪，美国亨特利公司；MASTERSIZER 3000 激光粒度分析仪，英国马尔文帕纳科公司；PEN3 电子鼻，德国爱森斯公司；Alpha MOS ASTREE 电子舌－

味觉分析仪，法国 Alpha MOS 公司；DHR-1 型流变仪，美国 TA 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 桑葚浆的制备

冷冻的桑葚放在常温下带包装水浴解冻，然后放入破壁机中打浆，再放入高速均质机搅拌均匀，分装到食品级 PET 塑料瓶中[8]，300 mL/ 瓶。

### 1.2.2 杀菌及冻融循环处理

将桑葚浆分为对照组（不杀菌，Y），巴氏杀菌组（80 ℃ /20 s，以中心温度达到 80 ℃时开始计时，TP）和超高压杀菌组（550 MPa/5 min，HPP）[9]。在超净工作台将处理好的桑葚浆包装打开取样，剩余的样品密封后放在 −18 ℃冰箱冷冻 3 d，然后放在 4 ℃冷库解冻 20 h，打开包装后取样，剩余的样品密封后冷冻，依次冻融循环取样 5 次。

### 1.2.3 微生物的测定

菌落总数参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行测定[10]，酵母菌和霉菌参照 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》中的“霉菌和酵母平板计数法”进行测定[11]。

### 1.2.4 pH值、可溶性固形物（TSS）和总酸（TA）的测定

桑葚浆的 pH 值采用 pH 计直接测定；TSS 采用数字阿贝折射仪测定；TA 采用 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》的方法测定[12]。

### 1.2.5 色泽的测定

参考 Li 等[13]的方法，采用全自动色差仪对样品的色泽进行测定，以未处理的桑葚浆为色差测定的参比样，色差结果以 $L^*$、$a^*$、$b^*$ 表示。色泽变化程度（$\Delta E^*$）计算见式（1）。

$$\Delta E=\sqrt{(L-L_0)^2+(a-a_0)^2+(b-b_0)^2} \quad (1)$$

式中：

$\Delta E$——桑葚浆色泽变化程度；

$L$——TP 和 HPP 处理桑葚浆的明亮值；

$L_0$——未处理桑葚浆的明亮值；

$a$——TP 和 HPP 处理桑葚浆的红绿值；

$a_0$——未处理桑葚浆的红绿值；

$b$——TP 和 HPP 处理桑葚浆的黄蓝值；

$b_0$——未处理桑葚浆的黄蓝值。

### 1.2.6 褐变度的测定

取 2 mL 桑葚浆 +2 mL 95%（$\varphi$）乙醇混合，4 ℃下 8 000 r·min$^{-1}$ 离心 10 min，取 1 mL 上清液 +9 mL 95%（$\varphi$）乙醇置于试管中混匀，在波长 420 nm 处测其吸光值[14]。

### 1.2.7 总花色苷的测定

取 1 g 桑葚浆与 10 mL 1 wt.% 盐酸甲醇混匀，超声 10 min 后，25 ℃下 8 000 r·min$^{-1}$ 离心 10 min，取上清液。沉淀再加入 10 mL 1 wt.% 盐酸甲醇混匀，重复以上操作，最后合并上清液，加水定容至 25 mL 即为提取液。采用 pH 示差法测定花色苷含量[15]。

### 1.2.8 总酚的测定

参照 Kwaw 等[16]的方法，采用 Folin-Ciocalteu 法测定总酚含量，并略作修改。提取液制备：同 1.3.7 花色苷提取液制备方法。具体操作：取 1 mL 提取液和 4 mL 水混匀稀释，取 1 mL 稀释样，加入 2 mL Folin-Ciocalteu 试剂，振荡混合，再加入 2 mL 10 wt.% 碳酸钠溶液，避光放置 1 h，在 760 nm 处测定吸光值。以没食子酸为标准品，含量以没食子酸当量（GAE）mg·g$^{-1}$ 表示。

### 1.2.9 单体酚含量测定

采用高效液相色谱法测定。根据 Zou 等[8]和王夷秀等[17]方法并稍作改动。标准品用无水甲醇溶解，提取液同花色苷和总酚提取液，过 0.22 μm 有机膜后测定。

色谱柱型号：C18 Kinetex 色谱柱，150 mm×4.6 mm，2.6 μm。

色谱条件：流动相 A 为 4.5% 甲酸水溶液，流动相 B 为 100% 乙腈，流量 0.45 mL·min$^{-1}$，柱温为 35 ℃。梯度洗脱程序为：0~5 min，5% B；5~25 min，5%~25% B；25~30 min，25%~ 35% B；30~31 min，35%~100% B；31~36 min，100% B；36~37 min，100%~5% B；37~57 min，5% B，进样量 5 μL，时间 60 min，扫描波长 190~800 nm。

检测波长为：没食子酸、原儿茶酸 280 nm；绿原酸、新绿原酸、咖啡酸、对香豆酸 320 nm；芦丁、槲皮素 -3-*O*- 葡萄糖苷 350 nm；C-3-G，C-3-R 520 nm，采用外标法定量。

### 1.2.10 平均粒度的测定

参考姜平等[18]方法。使用激光粒度仪测定，测定过程采用湿法手动测量：吸取一定量桑葚浆样品均匀分散在去离子水中，使响应值在最佳区间，测定颗粒大小的分布情况，平均粒径用 $D_{4,3}$ 表示。

### 1.2.11 流变性质的测定

#### 1.2.11.1 静态流变性质

参考于甜等[19]方法并稍有改动。选择夹具 40 PP，

将剪切速率设为自变量，表观黏度设为因变量，样品的剪切速率变换范围设定为 0.1~100 $s^{-1}$，在 25 ℃下测量样品表观黏度随剪切速率的变化曲线。

1.2.11.2 动态流变性质

参考于甜[19]的方法并稍有改动。其中，固定振荡应变在 3%，角频率变换范围设定为 0.1~70 $rad·s^{-1}$，测定样品的弹性模量 $G'$、粘性模量 $G''$ 和 tan$\delta$ 损耗角正切随角频率的变化曲线。

### 1.2.12 电子鼻的测定

参考 Chen 等[20]方法并稍有改动。取 3 mL 样品于 50 mL 离心管中，用保鲜膜封口，于室温静置 1 h 后测定。设电子鼻清洗和检测时间各为 120 s，进样流速为 400 $mL·min^{-1}$。

### 1.2.13 电子舌的测定

参照毛红艳等[21]的方法稍作修改。称取 4 mL 样品加蒸馏水定容至 90 mL，8 000 $r·min^{-1}$ 离心 10 min，取上清液，过滤后收集滤液后测定。数据采集前，对电子舌传感器进行活化、校准等操作，确保检测数据的可靠性与稳定性[22]。

### 1.2.14 统计分析

每组实验 3 个平行，结果由平均数 ± 方差表示。采用 Origin 2021 和 Microsoft Excel 系统软件进行数据分析，方差分析选取 Duncan 检验，在 $P<0.05$ 检验水平上对数据进行统计学分析[23]。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆微生物指标的影响

由表 1 可知，Y 的初始菌落总数为 $1.8\times10^3$ CFU/mL，TP 和 HPP 处理后菌落总数下降至 100 CFU/mL 以下，其中 TP 组菌落总数最少。在反复冻融过程中，Y 的菌落总数在前 4 次冻融循环中逐渐减少，随后增加；TP 的菌落总数呈现波动下降的趋势，表明反复冻融可抑制微生物的生长，这可能是反复冷冻－解冻破坏了微生物菌体结构，但部分菌体只是休眠，未完全失活，温度适宜下会重新复活[24]。HPP 组菌落总数变化较大，趋势不明显，原因可能是 HPP 使得微生物处于不可培养的亚致死状态，冷冻抑制了微生物的生长和繁殖，解冻后微生物在适宜温度下恢复活力[25]。

Y 的初始霉菌和酵母菌总数为 87 CFU/mL，随着冻融次数增加，其变化趋势与菌落总数一致；而 TP 和 HPP 在第 0~5 次冻融中均无检出，说明霉菌及酵母菌可能对温度和压力较为敏感，TP 和 HPP 处理可以有效杀死霉菌及酵母菌。

**表 1 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆微生物的影响**

**Table 1 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on microorganisms of mulberry pulp**

| 指标 | 冻融次数 | Y | TP | HPP |
|---|---|---|---|---|
| 菌落总数/(CFU/mL) | 0 | $1.8\times10^3\pm152.75^{a}$ | $66.67\pm15.28^{ghi}$ | $80.00\pm0.00^{fgh}$ |
| | 1 | $500.00\pm50.00^{b}$ | $83.33\pm15.28^{fgh}$ | $90.00\pm5.77^{efgh}$ |
| | 2 | $256.67\pm15.28^{c}$ | $16.67\pm5.77^{hi}$ | $150.00\pm5.77^{def}$ |
| | 3 | $113.33\pm20.82^{efg}$ | $23.33\pm5.77^{hi}$ | $33.33\pm5.77^{hi}$ |
| | 4 | $83.33\pm15.28^{fgh}$ | $30.00\pm10.00^{hi}$ | $220.00\pm26.46^{cd}$ |
| | 5 | $160.00\pm34.64^{de}$ | ND | $60.00\pm10.00^{ghi}$ |
| 霉菌及酵母菌/(CFU/mL) | 0 | $86.67\pm15.28^{a}$ | ND | ND |
| | 1 | $83.33\pm15.28^{a}$ | ND | ND |
| | 2 | $33.33\pm5.77^{c}$ | ND | ND |
| | 3 | $26.67\pm5.77^{cd}$ | ND | ND |
| | 4 | $16.67\pm5.77^{d}$ | ND | ND |
| | 5 | $46.67\pm11.55^{b}$ | ND | ND |

注：Y、TP 和 HPP 分别代表未处理、巴氏杀菌处理和超高压处理的原浆；“ND”表示未检出；重复次数 n=3，对同一指标的所有数据进行统计分析，同一指标的不同字母表示具有显著性差异（$P<0.05$）。

### 2.2 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆pH值、可溶性固形物（TSS）和总酸（TA）的影响

如表 2 所示，不同杀菌方式及冻融循环对桑葚浆的 pH 值（3.65~3.80）和 TSS（10.65~11.34 °Brix）影响较小。王莉梅等[7]研究发现，TP 和 HPP 处理对石榴汁 pH 和 TSS 无显著性影响。

第 0 次冻融的 Y、TP 和 HPP 的总酸分别为 11.07、10.24 和 10.75 $g·kg^{-1}$，无显著性差异，这在张丽娟等[26]关于超高压和热处理黄皮原浆的研究中亦有发现。然而，Y 在第 1、3 次冻融总酸增加较显著；TP 第 1~2 次冻融总酸升高，第 3~4 次冻融变化不大，第 5 次冻融有所下降；HPP 第 1~2 次冻融总酸显著上升。整体而言，第 1 次冻融变化最为显著，可能的原因是第 1 次冷冻、解冻对桑葚浆体系破坏最大，果浆内酸性物质溶出，导致总酸升高。

表 2 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆pH值、TSS和TA的影响

Table 2 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on pH value, TSS and TA of mulberry pulp

| 指标 | 冻融次数 | Y | TP | HPP |
|---|---|---|---|---|
| pH 值 | 0 | 3.76 ± 0.01$^{cd}$ | 3.73 ± 0.02$^{e}$ | 3.73 ± 0.01$^{e}$ |
| | 1 | 3.76 ± 0.01$^{cd}$ | 3.76 ± 0.01$^{d}$ | 3.74 ± 0.00$^{e}$ |
| | 2 | 3.69 ± 0.01$^{g}$ | 3.74 ± 0.01$^{e}$ | 3.70 ± 0.01$^{f}$ |
| | 3 | 3.65 ± 0.01$^{i}$ | 3.67 ± 0.00$^{h}$ | 3.65 ± 0.01$^{i}$ |
| | 4 | 3.78 ± 0.01$^{b}$ | 3.77 ± 0.01$^{bcd}$ | 3.76 ± 0.01$^{cd}$ |
| | 5 | 3.77 ± 0.01$^{bc}$ | 3.80 ± 0.00$^{a}$ | 3.78 ± 0.00$^{b}$ |
| TSS/(°Brix) | 0 | 11.22 ± 0.08$^{ab}$ | 11.20 ± 0.09$^{b}$ | 11.34 ± 0.13$^{a}$ |
| | 1 | 11.31 ± 0.02$^{ab}$ | 11.28 ± 0.03$^{ab}$ | 11.26 ± 0.12$^{ab}$ |
| | 2 | 11.30 ± 0.03$^{ab}$ | 11.26 ± 0.04$^{ab}$ | 11.21 ± 0.03$^{ab}$ |
| | 3 | 11.31 ± 0.13$^{ab}$ | 11.30 ± 0.04$^{ab}$ | 11.23 ± 0.02$^{ab}$ |
| | 4 | 11.27 ± 0.06$^{ab}$ | 11.08 ± 0.02$^{c}$ | 11.23 ± 0.03$^{ab}$ |
| | 5 | 11.33 ± 0.06$^{ab}$ | 10.65 ± 0.01$^{d}$ | 11.06 ± 0.04$^{c}$ |
| TA/($g \cdot kg^{-1}$) | 0 | 11.07 ± 0.27$^{cdef}$ | 10.24 ± 0.00$^{fg}$ | 10.75 ± 0.72$^{ef}$ |
| | 1 | 13.57 ± 0.72$^{a}$ | 11.71 ± 0.27$^{bcd}$ | 12.16 ± 0.00$^{b}$ |
| | 2 | 10.69 ± 0.27$^{ef}$ | 11.01 ± 0.18$^{cdef}$ | 11.84 ± 0.45$^{bc}$ |
| | 3 | 12.03 ± 0.18$^{b}$ | 10.62 ± 0.1$^{efg}$ | 10.94 ± 0.63$^{def}$ |
| | 4 | 11.39 ± 0.18$^{bcde}$ | 10.30 ± 0.27$^{fg}$ | 10.69 ± 0.27$^{ef}$ |
| | 5 | 10.88 ± 0.36$^{def}$ | 9.79 ± 0.09$^{g}$ | 10.62 ± 0.36$^{efg}$ |

注：重复次数 $n$=3，对同一指标的所有数据进行统计分析，同一指标的不同字母表示具有显著性差异（$P$＜0.05）。

## 2.3 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆色差的影响

色差 $L^*$ 值、$a^*$ 值和 $b^*$ 值分别表示样品的明亮程度、红绿程度和黄蓝程度。从表 3 中可以看出，与未处理原浆相比，不同杀菌方式（TP 和 HPP）原浆的 $L^*$ 值有所下降，HPP 组 $a^*$ 值略微上升，TP 和 HPP 组 $b^*$ 值变化最大，上升明显。

在冻融循环过程中，不同处理组的 $L^*$ 值变化幅度不大，林富斌等[27]研究冻融次数对蓝莓色差的影响，同样发现冻融对蓝莓明亮值影响并不大；$a^*$ 值在第 1 次冻融后下降最明显，随后升高并保持相对稳定；$b^*$ 值则在第 1 次冻融后快速上升，这可能是第 1 次冻融使得桑葚浆花色苷降解较快，导致果浆色泽变化相对较大。

$\Delta E^*$ 值代表色泽的变化程度，当其超过 2 时可发生肉眼可见的变化。在反复冻融过程中，3 组样品的 $\Delta E^*$ 值略有差异，但都小于 2，表明不同杀菌和冻融处理对桑葚浆的色泽无肉眼可见的改变。

表 3 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆色差的影响

Table 3 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on color difference of mulberry pulp

| 指标 | 冻融次数 | Y | TP | HPP |
|---|---|---|---|---|
| $L^*$ 值 | 0 | 22.89 ± 0.19$^{abc}$ | 21.39 ± 0.44$^{de}$ | 21.80 ± 0.08$^{d}$ |
| | 1 | 23.03 ± 0.25$^{a}$ | 22.56 ± 0.20$^{abc}$ | 22.81 ± 0.13$^{abc}$ |
| | 2 | 22.98 ± 0.19$^{ab}$ | 22.74 ± 0.07$^{abc}$ | 21.30 ± 0.49$^{e}$ |
| | 3 | 22.77 ± 0.04$^{abc}$ | 22.52 ± 0.24$^{bc}$ | 22.58 ± 0.06$^{abc}$ |
| | 4 | 22.43 ± 0.06$^{c}$ | 22.45 ± 0.06$^{c}$ | 22.60 ± 0.02$^{abc}$ |
| | 5 | 22.83 ± 0.01$^{abc}$ | 22.80 ± 0.21$^{abc}$ | 22.71 ± 0.10$^{abc}$ |
| $a^*$ 值 | 0 | 2.45 ± 0.04$^{b}$ | 2.39 ± 0.03$^{b}$ | 2.56 ± 0.04$^{a}$ |
| | 1 | 1.98 ± 0.06$^{de}$ | 1.71 ± 0.02$^{hi}$ | 1.92 ± 0.01$^{ef}$ |
| | 2 | 2.00 ± 0.08$^{de}$ | 1.67 ± 0.05$^{i}$ | 1.83 ± 0.00$^{fg}$ |
| | 3 | 2.15 ± 0.02$^{c}$ | 1.77 ± 0.03$^{gh}$ | 2.06 ± 0.00$^{cd}$ |
| | 4 | 2.03 ± 0.00$^{d}$ | 1.80 ± 0.02$^{gh}$ | 1.97 ± 0.06$^{gh}$ |
| | 5 | 2.01 ± 0.03$^{de}$ | 1.80 ± 0.08$^{gh}$ | 1.95 ± 0.02$^{gh}$ |
| $b^*$ 值 | 0 | −0.18 ± 0.07$^{h}$ | 0.18 ± 0.15$^{g}$ | 0.23 ± 0.06$^{g}$ |
| | 1 | 0.54 ± 0.13$^{cde}$ | 0.55 ± 0.01$^{cde}$ | 0.47 ± 0.02$^{def}$ |
| | 2 | 0.57 ± 0.08$^{bcde}$ | 0.45 ± 0.10$^{def}$ | 0.32 ± 0.12$^{fg}$ |
| | 3 | 0.67 ± 0.06$^{abc}$ | 0.52 ± 0.08$^{cde}$ | 0.68 ± 0.07$^{abc}$ |
| | 4 | 0.81 ± 0.04$^{a}$ | 0.42 ± 0.06$^{ef}$ | 0.63 ± 0.06$^{abcd}$ |
| | 5 | 0.75 ± 0.06$^{ab}$ | 0.64 ± 0.02$^{abcd}$ | 0.67 ± 0.06$^{abc}$ |
| $\Delta E^*$ 值 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 1 | 0.94 ± 0.07$^{bc}$ | 1.41 ± 0.17$^{ab}$ | 1.23 ± 0.12$^{abc}$ |
| | 2 | 0.89 ± 0.06$^{c}$ | 1.58 ± 0.32$^{a}$ | 0.97 ± 0.23$^{bc}$ |
| | 3 | 0.92 ± 0.10$^{bc}$ | 1.35 ± 0.15$^{abc}$ | 1.04 ± 0.06$^{bc}$ |
| | 4 | 1.17 ± 0.12$^{abc}$ | 1.25 ± 0.31$^{abc}$ | 1.08 ± 0.03$^{bc}$ |
| | 5 | 1.04 ± 0.07$^{bc}$ | 1.61 ± 0.15$^{a}$ | 1.19 ± 0.02$^{abc}$ |

注：重复次数 $n$=3，对同一指标的所有数据进行统计分析，同一指标的不同字母表示具有显著性差异（$P$＜0.05）。

## 2.4 不同杀菌方式和冻融循环对桑葚浆褐变度的影响

褐变度是衡量果汁品质的重要指标之一。从图 1 可以看出，HPP 组的褐变度与原浆接近，TP 组最高，可能是热效应造成的非酶褐变及营养成分的氧化降解[28]。而在冻融循环过程中，不同处理组的褐变度波动越来越大，但无明显变化趋势。

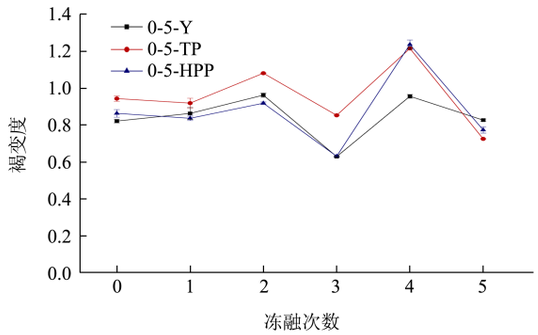



图 1 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆褐变度的影响

Fig.1 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on the Browning degree of mulberry pulp

## 2.5 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆花色苷的影响

从图 2 可以看出，第 0 次冻融的 3 组样品，其花色苷含量依次为 HPP＞TP＞Y，但无显著性差异。You 等[29]报道 TP 处理（70 ℃/5 min）和 HPP 处理（500 MPa/5 min）的总花色苷含量与对照组差异较小。不同杀菌处理的桑葚浆，其花色苷在冻融循环过程中变化幅度在 1.25~1.70 mg·g$^{-1}$ 范围内，变化不大。

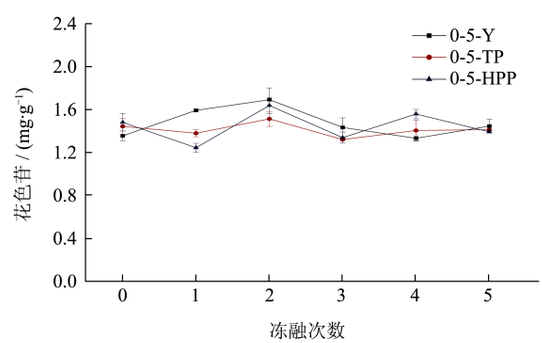



图 2 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆花色苷的影响

Fig.2 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on anthocyanins of mulberry pulp

## 2.6 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆总酚的影响

多酚是桑葚的重要活性成分，与抗氧化活性密切相关。如图 3 所示，未冻融前 HPP 组与 Y 组总酚含量相近，TP 组略高，但 3 者没有显著性差异。而在冻融循环过程中，各处理组总酚含量呈波动上升趋势。有研究表明[5]，酚类物质既可以游离形式存在，也可以通过与植物细胞壁基质的共价结合而存在，随着冻融次数增加，各组浆体细胞受反复冷冻－解冻过程中大冰晶的破坏，使细胞膜发生破裂，从而释放出更多的酚类物质。需要指出的是，HPP 组第 1 次冻融总酚下降明显，随后波动上升。这可能是由于 HPP 对过氧化物酶（POD）和多酚氧化酶（PPO）的钝化效果较弱，残余酶活消耗酚类物质的速度大于酚类物质的释放，从而使得总酚含量下降[9]。随着冻融次数增加，酚类物质的释放与降解发生变化，表现为总酚呈波动上升趋势，但整体变化幅度在 11.40~12.53 mgGAE·g$^{-1}$ 之间。

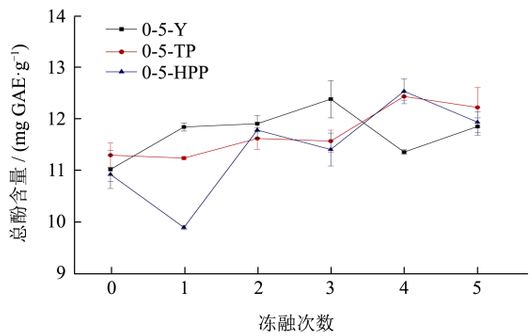



图 3 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆总酚的影响

Fig.3 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on total phenol of mulberry pulp

## 2.7 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆单体酚含量的测定

酚类物质的种类会直接影响浆体的色泽、口感和风味，且与涩味、苦味和甜味等风味密切相关[23]。为进一步研究冻融循环对多酚的影响，采用高效液相色谱（HPLC）法测定了桑葚浆的单体酚，结果如表 4 所示，共检测出 3 大类 10 种单体酚，包括 6 种酚酸：没食子酸、原儿茶酸、绿原酸、新绿原酸、咖啡酸和对香豆酸；2 种黄酮：芦丁和槲皮素 -3-*O*- 葡萄糖苷；2 种花色苷：C-3-G 和 C-3-R，这与 Zou 等[8]鉴定出的单体酚种类相同。

与不杀菌相比，不同杀菌方式对没食子酸、原儿茶酸、新绿原酸、绿原酸、对香豆酸、芦丁、槲皮素 -3-*O*- 葡萄糖苷和 C-3-G 共 8 种酚类物质影响较显著，其中 HPP 比 TP 处理能更好的保留桑葚浆中的单体酚。

在冻融循环过程中，各组酚酸含量相对较低，变化不规律。Y 组中芦丁含量在第 1 次冻融时下降了 39%，而 C-3-G 约上升了 31%，C-3-R 下降了 20%，随后波动相对较小。TP 组芦丁和矢车菊素 -3-*O*- 芸香糖苷含量在第 1 次冻融中分别下降 33% 和 25%，C-3-G 含量则呈现不规则变化，但两种花色苷在第 3 次冻融降至最低值。HPP 组芦丁和 C-3-R 含量在第 1 次冻融中大幅下降，而槲皮素 -3-*O*- 葡萄糖苷和 C-3-G 含量波动较大，规律不明显。总体上，第 1 次冻融对桑葚浆单体酚含量影响最大。

Zou 等[8]研究表明，酚类物质中的花色苷类在储藏过程中极易发生降解，降解原因可能是与其他酚类物质发生氧化和缩合反应有关。这对本研究冻融循环造成花色苷类下降的原因有一定参考价值。

表 4 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆单体酚含量的影响

**Table 4 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on monomer phenol content of mulberry pulp**

| 样品 | 单体酚含量/(μg·g$^{-1}$) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 没食子酸 | 原儿茶酸 | 绿原酸 | 新绿原酸 | 咖啡酸 | 对香豆酸 | 芦丁 | 槲皮素 -3-O- 葡萄糖苷 | C-3-G | C-3-R |
| 0-Y | 3.62 ± 0.02$^{gh}$ | 3.24 ± 0.04$^{a}$ | 4.32 ± 0.06$^{de}$ | 2.78 ± 0.01$^{a}$ | 4.35 ± 0.04$^{e}$ | 5.36 ± 0.01$^{a}$ | 16.58 ± 0.04$^{a}$ | 1.50 ± 0.75$^{ab}$ | 213.9 ± 0.91$^{k}$ | 83.43 ± 0.46$^{a}$ |
| 1-Y | 3.46 ± 0.02$^{i}$ | 2.47 ± 0.03$^{i}$ | 5.38 ± 0.07$^{b}$ | 1.99 ± 1.00$^{ab}$ | 6.55 ± 0.04$^{abc}$ | 5.03 ± 0.01$^{de}$ | 10.06 ± 0.03$^{j}$ | 1.61 ± 0.81$^{ab}$ | 279.8 ± 0.29$^{b}$ | 66.82 ± 0.12$^{bc}$ |
| 2-Y | 3.54 ± 0.02$^{hi}$ | 2.53 ± 0.03$^{hi}$ | 5.03 ± 0.02$^{bc}$ | 2.93 ± 0.01$^{a}$ | 6.68 ± 0.01$^{ab}$ | 4.92 ± 0.01$^{efg}$ | 9.91 ± 0.02$^{k}$ | 1.57 ± 0.79$^{ab}$ | 300.7 ± 0.25$^{a}$ | 69.04 ± 0.53$^{b}$ |
| 3-Y | 4.02 ± 0.02$^{cd}$ | 2.76 ± 0.01$^{efg}$ | 3.89 ± 0.09$^{efg}$ | 0.90 ± 0.90$^{bc}$ | 5.98 ± 0.23$^{bcd}$ | 4.40 ± 0.01$^{j}$ | 10.65 ± 0.01$^{g}$ | 0.74 ± 0.74$^{ab}$ | 269.7 ± 1.73$^{bc}$ | 62.05 ± 2.55$^{bcd}$ |
| 4-Y | 3.88 ± 0.02$^{ef}$ | 2.67 ± 0.02$^{g}$ | 4.18 ± 0.55$^{def}$ | ND | 6.30 ± 0.94$^{bcd}$ | 4.32 ± 0.17$^{jk}$ | 9.48 ± 0.01$^{l}$ | ND | 233.7 ± 2.03$^{ghij}$ | 52.30 ± 1.74$^{g}$ |
| 5-Y | 3.55 ± 0.06$^{hi}$ | 2.72 ± 0.05$^{fg}$ | 3.95 ± 0.09$^{efg}$ | ND | 5.91 ± 0.10$^{bcd}$ | 4.24 ± 0.00$^{k}$ | 10.06 ± 0.02$^{j}$ | 1.44 ± 0.72$^{ab}$ | 245.8 ± 0.22$^{defgh}$ | 54.82 ± 0.38$^{defg}$ |
| 0-TP | 2.93 ± 0.01$^{k}$ | 2.81 ± 0.05$^{e}$ | 3.54 ± 0.03$^{g}$ | ND | 4.25 ± 0.06$^{e}$ | 4.83 ± 0.00$^{gh}$ | 15.19 ± 0.03$^{c}$ | ND | 239.4 ± 0.61$^{efgh}$ | 82.04 ± 2.67$^{a}$ |
| 1-TP | 3.80 ± 0.03$^{f}$ | 3.07 ± 0.00$^{d}$ | 6.05 ± 0.03$^{a}$ | 3.04 ± 0.02$^{a}$ | 6.71 ± 0.01$^{ab}$ | 5.17 ± 0.02$^{bc}$ | 10.01 ± 0.01$^{j}$ | 1.56 ± 0.78$^{ab}$ | 228.9 ± 0.80$^{hijk}$ | 61.47 ± 1.72$^{cde}$ |
| 2-TP | 3.66 ± 0.04$^{g}$ | 3.04 ± 0.02$^{cd}$ | 5.40 ± 0.25$^{b}$ | 2.98 ± 0.04$^{a}$ | 6.75 ± 0.28$^{ab}$ | 5.33 ± 0.02$^{a}$ | 9.91 ± 0.04$^{k}$ | 2.46 ± 0.07$^{a}$ | 256.7 ± 1.98$^{cde}$ | 65.71 ± 3.65$^{bc}$ |
| 3-TP | 4.30 ± 0.01$^{a}$ | 3.15 ± 0.02$^{bc}$ | 4.20 ± 0.02$^{def}$ | 2.78 ± 0.01$^{a}$ | 5.55 ± 0.01$^{d}$ | 4.87 ± 0.00$^{fgh}$ | 10.20 ± 0.04$^{i}$ | 1.47 ± 0.74$^{ab}$ | 217.1 ± 0.33$^{jk}$ | 52.29 ± 0.28$^{g}$ |
| 4-TP | 4.14 ± 0.10$^{b}$ | 3.29 ± 0.05$^{a}$ | 4.33 ± 0.01$^{de}$ | 1.85 ± 0.93$^{ab}$ | 5.77 ± 0.08$^{cd}$ | 5.10 ± 0.04$^{bcd}$ | 10.98 ± 0.02$^{d}$ | 0.74 ± 0.74$^{ab}$ | 233.5 ± 1.08$^{ghij}$ | 59.88 ± 4.73$^{cdefg}$ |
| 5-TP | 3.95 ± 0.02$^{de}$ | 3.21 ± 0.03$^{ab}$ | 4.67 ± 0.09$^{cd}$ | ND | 7.16 ± 0.27$^{a}$ | 5.00 ± 0.02$^{def}$ | 10.73 ± 0.01$^{f}$ | 2.40 ± 0.09$^{a}$ | 237.2 ± 1.49$^{fghi}$ | 57.13 ± 1.11$^{defg}$ |
| 0-HPP | 3.17 ± 0.01$^{j}$ | 2.76 ± 0.04$^{efg}$ | 3.69 ± 0.04$^{fg}$ | ND | 4.57 ± 0.06$^{e}$ | 5.08 ± 0.01$^{cd}$ | 16.07 ± 0.04$^{b}$ | 2.23 ± 0.01$^{a}$ | 251.5 ± 0.51$^{def}$ | 86.39 ± 0.57$^{a}$ |
| 1-HPP | 4.04 ± 0.02$^{cd}$ | 2.38 ± 0.01$^{j}$ | 4.65 ± 0.06$^{cd}$ | 2.83 ± 0.01$^{a}$ | 5.91 ± 0.04$^{bcd}$ | 4.76 ± 0.01$^{h}$ | 8.55 ± 0.02$^{m}$ | 0.76 ± 0.76$^{ab}$ | 221.2 ± 0.80$^{ijk}$ | 53.32 ± 0.26$^{fg}$ |
| 2-HPP | 3.56 ± 0.01$^{h}$ | 2.57 ± 0.01$^{h}$ | 4.90 ± 0.06$^{c}$ | 2.93 ± 0.01$^{a}$ | 6.58 ± 0.04$^{abc}$ | 5.23 ± 0.02$^{ab}$ | 10.15 ± 0.03$^{i}$ | 2.17 ± 0.02$^{a}$ | 263.1 ± 22.59$^{bcd}$ | 62.05 ± 5.54$^{bcd}$ |
| 3-HPP | 4.06 ± 0.03$^{bc}$ | 2.78 ± 0.02$^{ef}$ | 3.88 ± 0.05$^{efg}$ | ND | 5.73 ± 0.11$^{cd}$ | 4.44 ± 0.01$^{j}$ | 10.15 ± 0.01$^{i}$ | 0.72 ± 0.72$^{ab}$ | 250.8 ± 0.27$^{defg}$ | 55.76 ± 0.17$^{defg}$ |
| 4-HPP | 3.82 ± 0.02$^{f}$ | 2.72 ± 0.03$^{efg}$ | 3.84 ± 0.06$^{efg}$ | 0.90 ± 0.90$^{bc}$ | 5.93 ± 0.11$^{bcd}$ | 4.61 ± 0.00$^{i}$ | 10.84 ± 0.02$^{e}$ | 2.21 ± 0.04$^{a}$ | 275.3 ± 1.75$^{b}$ | 60.51 ± 1.19$^{cdef}$ |
| 5-HPP | 3.53 ± 0.02$^{hi}$ | 2.68 ± 0.01$^{g}$ | 3.92 ± 0.14$^{efg}$ | ND | 5.92 ± 0.26$^{bcd}$ | 4.43 ± 0.01$^{j}$ | 10.40 ± 0.02$^{h}$ | 2.25 ± 0.05$^{a}$ | 253.1 ± 0.57$^{cdef}$ | 54.00 ± 2.70$^{efg}$ |

注：“C-3-G”和“C-3-R”分别代表矢车菊素 -3-*O*- 葡萄糖苷和矢车菊素 -3-*O*- 芸香糖苷；“0-Y”表示第 0 次冻融的原浆，下同；“ND”表示未检测出，不同字母表示同一单体酚的 3 组样品具有显著性差异（$P<0.05$）。

## 2.8 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆平均粒度的影响

果浆粒径大小及分布与其稳定性和感官密切相关。在粒度分布中，$D_{10}$、$D_{50}$ 和 $D_{90}$ 分别表示该样品有 10%、50% 和 90% 的颗粒所对应的直径，$D_{4,3}$ 表示平均粒径。颗粒粒径越小，沉淀速度越慢，口感越细腻，样品越稳定[18]。

从表 5 中可以看出，HPP 组粒径（$D_{10}$、$D_{50}$、$D_{90}$ 和 $D_{4,3}$，下同）与 Y 组接近，而 TP 组显著下降，田学智等[9]研究也发现，HPP 处理新疆复合果汁后，粒径与未处理组无显著变化；TP 组粒径下降可能与热处理导致桑葚浆中大颗粒分解有关[30]。反复冻融对不同杀菌处理的桑葚浆粒径影响不大。

**表 5 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆平均粒度的影响**

**Table 5 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on the average particle size of mulberry pulp**

| 粒径/μm | 冻融次数 | Y | TP | HPP |
|---|---|---|---|---|
| $D_{10}$ | 0 | 78.86 ± 0.85$^{def}$ | 68.08 ± 0.60$^{i}$ | 80.19 ± 1.38$^{bcde}$ |
| | 1 | 82.70 ± 0.55$^{ab}$ | 64.85 ± 0.49$^{j}$ | 78.41 ± 0.99$^{ef}$ |
| | 2 | 81.16 ± 1.47$^{abcd}$ | 64.32 ± 0.88$^{j}$ | 75.13 ± 0.82$^{gh}$ |
| | 3 | 81.56 ± 0.46$^{abc}$ | 64.10 ± 0.97$^{j}$ | 73.88 ± 0.21$^{h}$ |
| | 4 | 83.16 ± 0.45$^{a}$ | 65.71 ± 0.62$^{ij}$ | 79.34 ± 0.14$^{cdef}$ |
| | 5 | 82.01 ± 1.18$^{ab}$ | 66.59 ± 0.29$^{ij}$ | 76.95 ± 0.70$^{fg}$ |
| $D_{50}$ | 0 | 266.50 ± 2.54$^{de}$ | 232.10 ± 3.16$^{f}$ | 280.60 ± 4.72$^{ab}$ |
| | 1 | 278.03 ± 0.93$^{ab}$ | 226.03 ± 2.34$^{fg}$ | 276.70 ± 4.62$^{abc}$ |
| | 2 | 273.93 ± 4.42$^{abcd}$ | 221.03 ± 1.87$^{g}$ | 267.70 ± 1.73$^{cde}$ |
| | 3 | 271.70 ± 0.95$^{bcde}$ | 219.73 ± 3.41$^{g}$ | 263.70 ± 2.96$^{e}$ |
| | 4 | 282.20 ± 2.32$^{a}$ | 228.10 ± 2.70$^{fg}$ | 283.30 ± 0.84$^{a}$ |
| | 5 | 280.43 ± 3.96$^{ab}$ | 232.90 ± 2.95$^{f}$ | 276.40 ± 3.14$^{abc}$ |
| $D_{90}$ | 0 | 599.00 ± 4.65$^{c}$ | 543.33 ± 10.43$^{d}$ | 637.73 ± 6.99$^{a}$ |
| | 1 | 608.70 ± 6.61$^{bc}$ | 544.33 ± 9.24$^{d}$ | 619.33 ± 9.45$^{abc}$ |
| | 2 | 604.20 ± 9.65$^{bc}$ | 524.57 ± 11.44$^{d}$ | 629.67 ± 1.98$^{ab}$ |
| | 3 | 613.67 ± 2.82$^{abc}$ | 532.83 ± 6.41$^{d}$ | 607.97 ± 9.50$^{bc}$ |
| | 4 | 626.33 ± 6.05$^{ab}$ | 533.53 ± 5.10$^{d}$ | 629.43 ± 6.64$^{ab}$ |
| | 5 | 614.97 ± 5.46$^{abc}$ | 545.03 ± 10.98$^{d}$ | 614.67 ± 8.97$^{abc}$ |
| $D_{4,3}$ | 0 | 308.17 ± 1.93$^{cd}$ | 274.27 ± 4.25$^{e}$ | 325.17 ± 4.62$^{a}$ |
| | 1 | 316.83 ± 2.10$^{abcd}$ | 270.80 ± 3.42$^{ef}$ | 317.80 ± 4.82$^{abcd}$ |
| | 2 | 313.23 ± 4.79$^{bcd}$ | 262.57 ± 4.25$^{f}$ | 315.57 ± 1.59$^{abcd}$ |
| | 3 | 314.70 ± 1.18$^{abcd}$ | 264.80 ± 3.35$^{ef}$ | 307.70 ± 3.70$^{d}$ |
| | 4 | 323.27 ± 2.20$^{ab}$ | 269.40 ± 2.53$^{ef}$ | 323.73 ± 2.05$^{ab}$ |
| | 5 | 319.43 ± 3.28$^{abc}$ | 274.70 ± 4.26$^{e}$ | 316.23 ± 3.83$^{abcd}$ |

注：重复次数 $n$=3，对同一指标的所有数据进行统计分析，同一指标的不同字母表示具有显著性差异（$P$<0.05）。

## 2.9 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆流变特性的影响

### 2.9.1 静态流变

图 4 为不同杀菌方式下各组样品在冻融循环中表观黏度随剪切速率变化关系图。从图中可看出，体系的黏度均随剪切速率的增加而降低，这是典型的非牛顿流体的假塑性流动行为[18]。其中，Y 在第 0 次冻融黏度最高，第 1 次冻融黏度下降明显；TP 在第 1 次冻融黏度降至最低，随后逐渐上升；HPP 则呈现先下降后上升再下降的趋势。造成 3 组样品以上变化的原因可能是冻融循环导致桑葚浆体内冰晶不断融解和再形成，对浆体细胞反复挤压，造成机械损伤和内容物流出，黏度下降[18]，其中以第 1 次冻融影响最大。

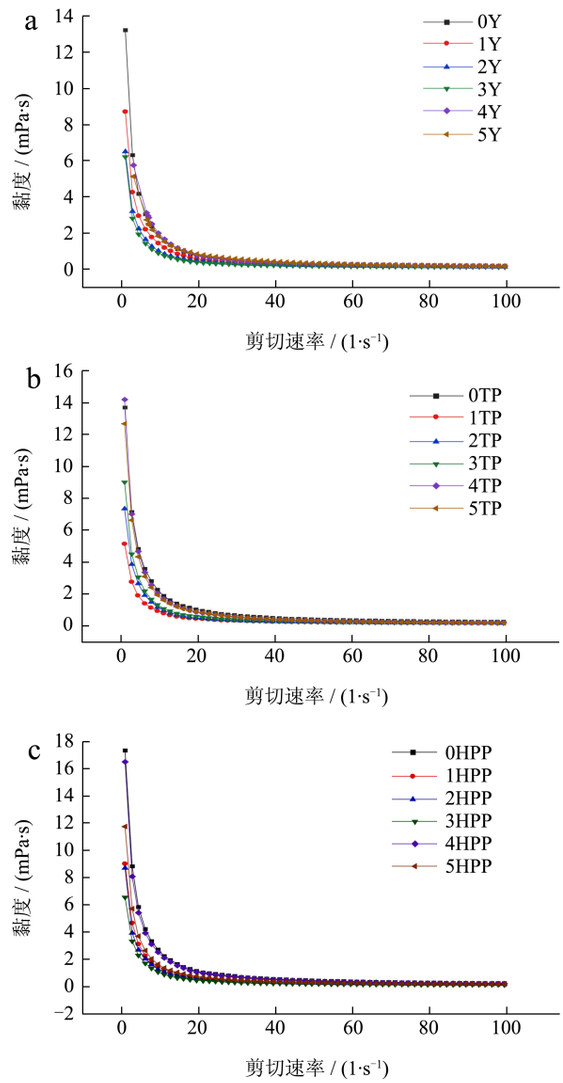



**图 4 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆静态流变的影响**

**Fig.4 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on static rheology of mulberry pulp**

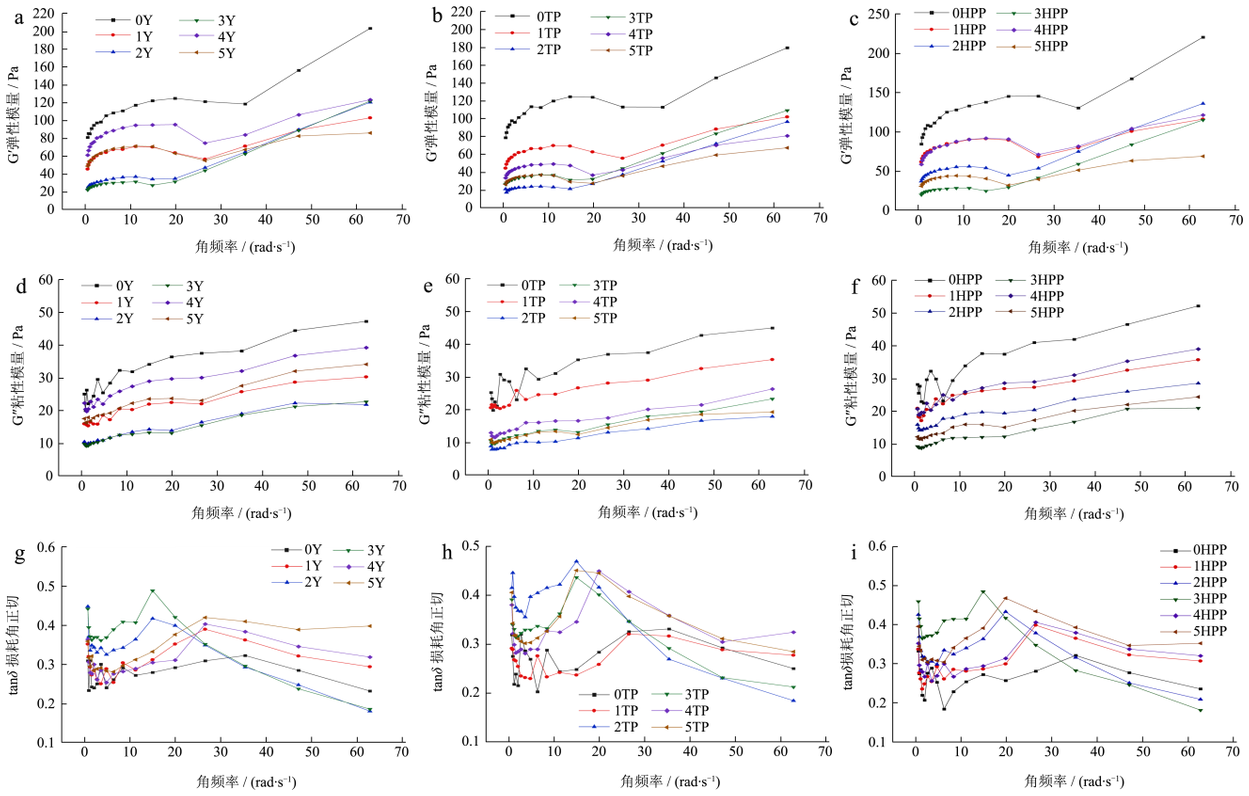



图 5 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆动态流变的影响

**Fig.5 The effects of different sterilization methods and freeze-thaw on dynamic rheology of mulberry pulp**

### 2.9.2 动态流变

动态流变仪是分析样品的弹性性质（$G'$）和粘性性质（$G''$）的一种重要手段[31]。$G'$ 表示物料在形变过程中储存的能量；$G''$ 表示在形变过程中物料为了抵抗黏性阻力而损失的能量[32]。tan$\delta$ 值的变化反映了样品组分中高聚物组成的变化，当材料的性质类似于固体时，$G''$ 小于 $G'$，tan$\delta$<1；反之，当材料性质类似于流体或粘性系统时，tan$\delta$>1。

由图 5a~5c 可以看出，桑葚浆的 $G'$ 均随着角频率的变化呈现先增大再减小后增大的趋势，其中第 0 次冻融的 $G'$ 最大；第 1 次冻融后，$G'$ 下降明显，表明第 1 次冻融循环中对桑葚浆 $G'$ 影响最大；后续 4 次冻融循环后变化较为稳定。

由图 5d~5f 可以看出，在冻融循环过程中桑葚浆 $G''$ 均随着角频率的变化呈现逐渐增大的趋势，但增加幅度较 $G'$ 小，其中各组的初始 $G''$ 最高，然后随着冻融循环次数的增加呈先下降后上升再下降的趋势。

图 5g~5i 反映的是冻融循环过程中桑葚浆的损耗角正切值（tan$\delta$）随角频率变化关系图。从图中可以看出，3 组样品的 tan$\delta$<1，则 $G''$ 小于 $G'$，桑葚浆的性质类似于固体，3 组样品 tan$\delta$ 随冻融次数增加，整体呈现波动上升趋势。

## 2.10 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆风味的影响

### 2.10.1 电子鼻雷达图分析

采用电子鼻分析不同杀菌方式及反复冻融对桑葚浆风味的影响，结果如图 6 所示。桑葚浆在 W5S（氮氧化物）、W1S（甲烷）、W1W（硫化合物、萜烯和有机硫化物）、W2S（乙醇）和 W2W（有机硫化物）等 5 个传感器有较高的响应值，而对 W1C（芳香族化合物）、W3C（氨、芳香族化合物）、W6S（氢气）、W5C（烷烃、芳香族成分）和 W3S（烷烃）响应值较低。其中，W1W 和 W1S 响应值最高，表明桑葚浆硫化合物、萜烯、有机硫化物和甲烷含量相对较多。由图 6a 可知，除热杀菌 W1W 响应值较高外，不同杀菌方式对桑葚浆其他风味品质影响不大。由图 6b~6c 可知，冻融循环过程中，Y 组在第 2 和 4 次冻融中，W1S、W1W、W2S 和 W2W 分别表现出最低和最高的响应值，其余冻融差别不大；TP 组在第 3 次冻融中，W1W 响应值最高，即硫化物含量最高，其余冻融差别不大；HPP 组在第 4 次冻融中，W2S 响应值最高，即乙醇含量最高，其余冻融差别不大，但仅根据雷达图观察传感器响应值无法准确区分 3 组

样品，故有必要利用 PCA 进行进一步的分析。

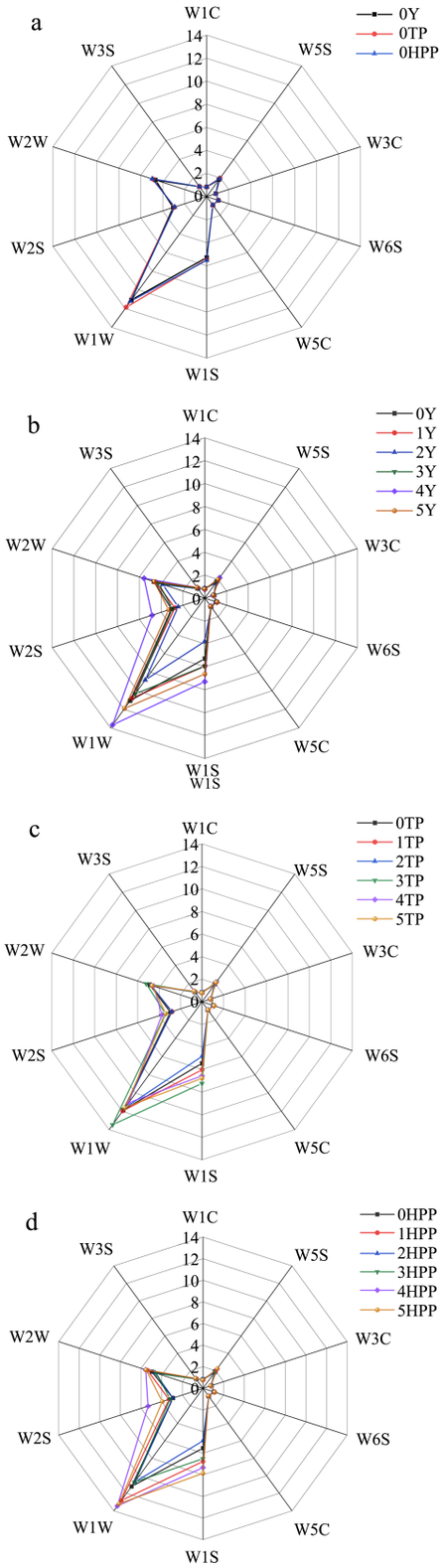



**图 6 不同杀菌方式和反复冻融后桑葚浆电子鼻的雷达图分析**

**Fig.6 Radar analysis of the electronic nose of mulberry pulp after different sterilization methods and freeze-thaw**

### 2.10.2 电子鼻主成分分析

不同杀菌方式及反复冻融对桑葚浆电子鼻响应值的 PCA 分析结果如图 7 所示，PC1 和 PC2 的总贡献值为 95.88%，表明电子鼻对桑葚浆的挥发性气味有明显的响应，能代表样品的全部信息。

从图中可以看到，冻融前 Y 组和 HPP 组距离较近，TP 组与 Y 组距离相对略远，表明热处理对桑葚浆风味影响大于超高压，HPP 处理能更好的保留桑葚浆的挥发性成分。相同杀菌处理的样品，冻融前后也有一定区分，说明冻融处理对桑葚浆挥发性成分具有一定影响。可能是桑葚浆在热处理或冻融处理后，细胞内的组织发生损伤，导致挥发性物质与细胞的结合能力下降，造成部分挥发性物质流失或分解成具有其他特征的物质所致[27]。

在 Y 组中，第 0、1 次冻融距离较近；第 2~5 次冻融区分明显，说明 1 次冻融对桑葚浆挥发性成分影响不大，从第 2 次冻融开始后，产生了不同的挥发性成分。

在 TP 组中，第 0 和 1 次冻融有轻微的重叠，第 2、3 次较第 4、5 次冻融区分明显，说明热处理的桑葚浆在第 4 次冻融后挥发性成分发生了较大变化，可能产生不良的挥发性成分。

在 HPP 组中，第 0 次冻融与第 1、2 次冻融区分明显；第 3~5 次冻融则较为接近，甚至有轻微的重叠，说明随着冻融次数的增加，桑葚浆在挥发性成分变化上趋于接近。

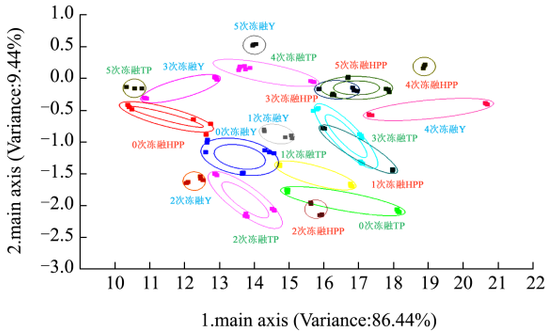



**图 7 不同杀菌方式和反复冻融后桑葚浆电子鼻的 PCA 分析图**

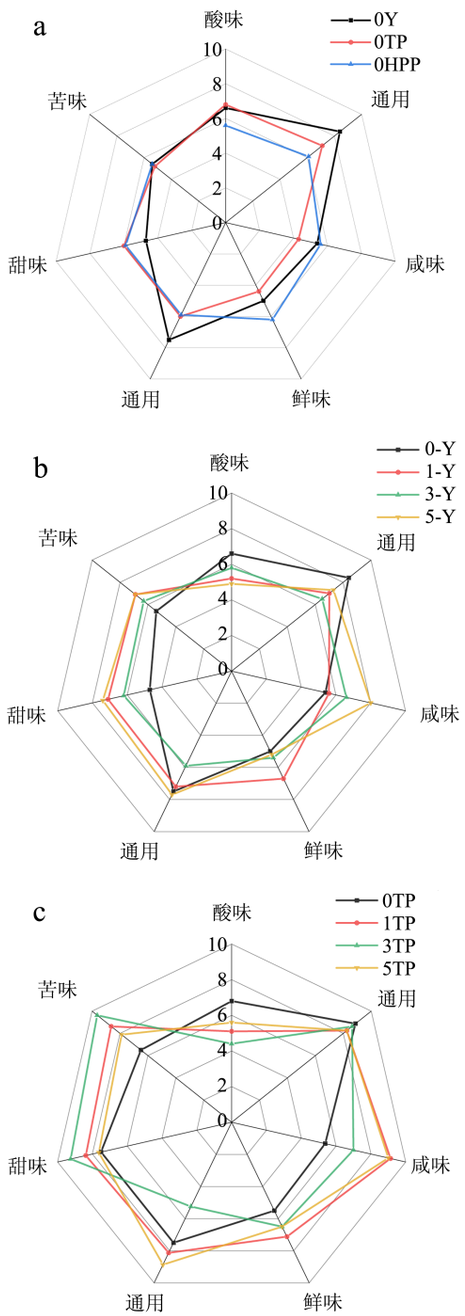
**Fig.7 PCA analysis of the electronic nose of mulberry pulp after different sterilization methods and freeze-thaw**

## 2.11 不同杀菌方式和反复冻融对桑葚浆电子舌感官的影响

### 2.11.1 电子舌雷达图分析

本研究采用电子舌测定不同杀菌处理的桑葚浆经过 0、1、3 和 5 次冻融后滋味的差异。如图 8a 中，杀菌方式上，Y 组和 TP 组在酸味和苦味上相近；TP 组鲜味最低；HPP 组和 Y 组在咸味、甜味和苦味上相近，

同时它酸味最低，鲜味最高，滋味上优于 Y 和 TP 组。图 8b~8c 中，冻融循环方面，第 0 次冻融的 Y 和 TP 组，在滋味上与其余冻融组存在较显著差异，说明冻融对其滋味有一定影响。在第 1、3 和 5 次冻融中，Y 组和 TP 组的咸、鲜、甜和苦味波动式上升，酸味波动式下降；HPP 组经过第 1、3 次冻融后，滋味与未冻融时相差不大，但第 5 次冻融时，甜味、苦味明显下降，酸味明显上升，可能滋味发生了变化。桑葚浆中的咸味可以增强果浆的清爽感，且有研究发现鲜味有助于增加食物的适口性，从而促进食物的选择和摄入[33]。



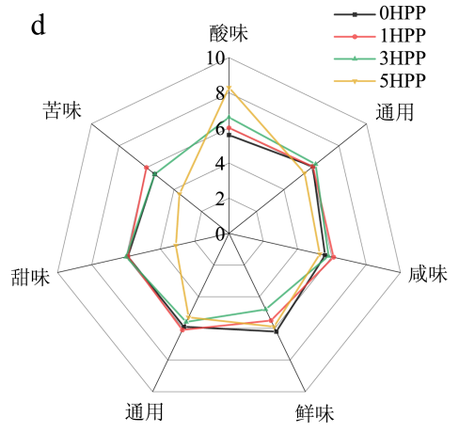
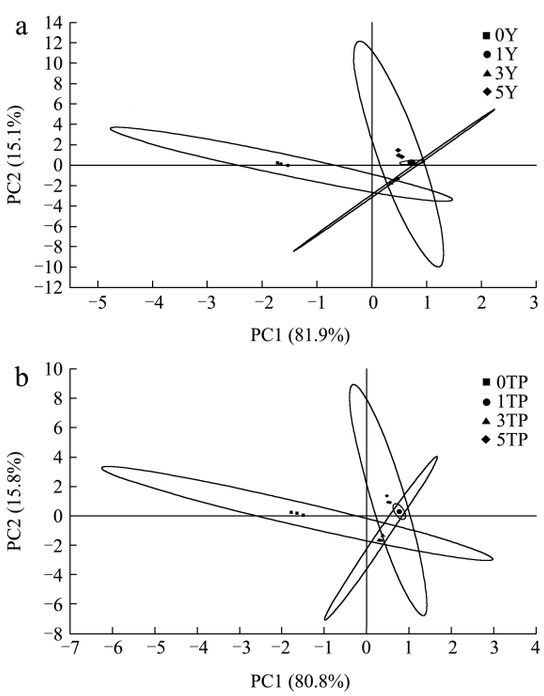




**图 8 不同杀菌方式和反复冻融后桑葚浆电子舌的雷达图分析**

**Fig.8 Radar analysis of the electronic tongue of mulberry pulp after different sterilization methods and freeze-thaw**

### 2.11.2 电子舌主成分分析

对 3 组样品进一步做 PCA 分析。图 9 中 Y、TP 和 HPP 的 PCA 总贡献率分别为 97%、96.6% 和 92.1%，说明电子舌 PCA 可以很好的反映不同杀菌处理及反复冻融桑葚浆间的差异性。每种样品呈现很好的聚集性，图 9a~9c 图的第 0 次冻融的 3 组样品都在坐标轴的左边，在 PC1 上与其余 3 次冻融有明显的区分，证明不同杀菌处理对样品滋味影响较小，但冻融影响较大；第 1、5 次冻融的 3 组样品分别在 PC1 和 PC2 上都较接近，说明滋味上可能相差不大；第 3 次冻融的 3 组样品都在坐标轴的正下方，在 PC2 上有一定区分，滋味上有一定区别。以上可见主成分分析可以很好地区分样品，并能很好地反映样本的特性。



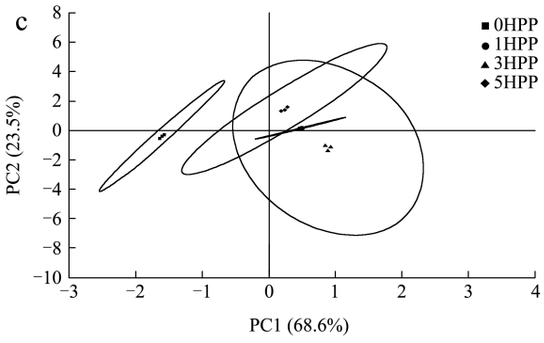



**图 9 不同杀菌方式和反复冻融后桑葚浆电子舌的 PCA 分析图**

**Fig.9 PCA analysis of the electronic tongue of mulberry pulp after different sterilization methods and freeze-thaw**

## 3 结论

为阐明桑葚浆经不同杀菌方式处理及反复冻融过程中的品质变化规律，本研究采用 HPLC、电子鼻、电子舌及常规分析方法，比较了未处理原浆、巴氏杀菌和超高压杀菌及 5 次冻融循环对桑葚浆品质的影响。结果表明，TP 能较好的控制桑葚浆的微生物数量（菌落总数＜100 CFU/mL），HPP 则能更好的保持桑葚浆的色泽、风味和滋味，平均粒径 $D_{4,3}$ 变化幅度小于 6%；常规指标（pH 值、TSS、霉菌控制）二者差异不显著。在冻融循环方面，未杀菌组（Y）初始菌落总数及霉菌酵母数值高，分别为 $1.8\times10^3$ CFU/mL 和 87 CFU/mL，虽然冻融 1 次后菌落总数下降了 72%，但仍有 500 CFU/mL，建议杀菌后使用；TP 组第 2 次冻融总花色苷达峰值（1.52 $mg\cdot g^{-1}$），但伴随第 3 次冻融时单体花色苷急速下降，其中 C-3-G 和 C-3-R 分别下降 15% 和 20%，硫化物增加约 22%，建议冻融≤2 次；HPP 组：第 4 次冻融菌落总数最高，为 220 CFU/mL，褐变值达 1.24，乙醇生成量增加，建议冻融≤3 次。

综上所述，HPP 技术可最大限度维持冻融桑葚浆的综合品质，建议产业依据杀菌工艺严格管控冻融次数，同时需避免贮藏过程中大幅度的温度波动，以延长产品货架期并保持其品质。

## 参考文献


[1] LV M S, LIU X L, LIU R Q, et al. Analysis of the antioxidant efficacy substances in fermented black mulberry juice and their preventive effects on oxidative stress in C2C12 cells [J]. Food Chemistry, 2025, 473: 142988.

[2] LI M Y, XU X X, JIA Y F, et al. Transformation of mulberry polyphenols by *Lactobacillus plantarum* SC-5: Increasing phenolic acids and enhancement of anti-aging effect [J]. Food Research International, 2024, 192: 114778.

[3] WANG Y T, WU H, WU J J, et al. The hypoglycemic effect of mulberry (*Morus atropurpurea*) fruit lacking fructose and glucose by regulation of the gut microbiota [J]. Food & Function, 2025, 16(6): 2444-2460.

[4] YANG X L, YANG L, ZHENG H Y. Hypolipidemic and antioxidant effects of mulberry（*Moms alba* L.) fruit in hyperlipidaemia rats [J]. Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research, 2010, 48(8-9): 2374-2379.

[5] LIN L, FAN J T, PAN S Y, et al. Effects of hypothermia–hypoxia pulping, high hydrostatic pressure processing, and repeat freeze-thaw cycles on the quality of raw kiwifruit puree [J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(4): e14595.

[6] 冉露霞,王俊杰,成臣,等.超高压和巴氏杀菌对百香果汁贮藏期品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(3):56-66.

[7] 王莉梅,肖逸,李游,等.超高压和巴氏杀菌对石榴果汁饮料品质影响的研究[J].食品科技,2023,48(6):89-94.

[8] ZOU B, XU Y J, WU J J, et al. Phenolic compounds participating in mulberry juice sediment formation during storage [J]. Journal of Zhejiang University. Science. B, 2017, 18(10): 854-866.

[9] 田学智,刘一璇,王芯媛,等.超高压处理对新疆复合果汁贮藏期微生物及品质的影响[J].食品科技,2022,47(5):127-134.

[10] GB 4789.2-2022,食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S].

[11] GB 4789.15-2016,食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数[S].

[12] GB 12456-2021,食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S].

[13] LI H C, SHEN N, REN J N, et al. Effects of cyclodextrins on phenolic acids biotransformation and color and volatile substances stabilization in sequentially fermented apple juice [J]. Food Bioscience, 2024, 60, 104465.

[14] LIU Q L, YI Y, WANG S Q, et al. Non-enzymatic browning of lotus root during boiling [J]. LWT, 2023, 173: 114191.

[15] JI L F, KE Y, JIA S S, et al. Extraction, purification, content analysis and hypoglycemic effect of mulberry marc anthocyanin [J]. Pharmacognosy Magazine, 2020, 16(67): 68-75.

[16] KWAW E, MA Y, TCHABO W, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2018, 250, 148-154.

[17] 王夷秀,陈芹芹,毕金峰,等.不同解冻方法对速冻桑葚汁液流失率、理化品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2017,38(7):149-154.

[18] 姜平,谭斌,龚雪梅,等.冻融对红豆浓浆稳定性及流变学特性的影响研究[J].粮油食品科技,2021,2:166-172.

[19] 于甜.软质食品流变学特性及测量方法的研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[20] CHEN L N, WANG T N, SUI Y H, et al. Effects of different sterilisation methods on the quality and flavor of non from concentrate (NFC) Actinidia arguta juice [J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102354.

[21] 毛红艳,祖力皮牙·买买提,王佳敏,等.基于电子感官技术结合HP-SPME-GC-MS分析不同馕的关键风味物质[J].中国粮油学报,2025,40(4):176-185.

[22] REN G X, LI T H, WEI Y M, et al. Estimation of Congou black tea quality by an electronic tongue technology combined with multivariate analysis [J]. Microchemical Journal, 2020, 163, 105899.

[23] 郑自奋,陈晓维,邹波,等.不同品种余甘子果实营养成分分析及加工特性评价[J].现代食品科技,2024,7:166-176.

[24] 曹新桥.反复冻融对鸭胸肉品质的影响[J].肉类工业,2022,9:13-18.

[25] 余雪松.冻藏、冻融和解冻复热方式对预制品莲藕肉圆品质的影响[D].扬州:扬州大学,2024.

[26] 张丽娟,邹波,肖更生,等.黄皮原浆超高压和热杀菌的比较分析[J].现代食品科技,2021,37(9):200-206.

[27] 林富斌.基于组学分析方法研究冻融对蓝莓冻果特性和风味影响[D].杭州:浙江工商大学,2021.

[28] 杜宝磊.超高压杀菌桑葚汁工艺优化及贮藏稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2016.

[29] YOU Y L, NA L, XUE H, et al. Influence of different sterilization treatments on the color and anthocyanin contents of mulberry juice during refrigerated storage [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 48: 1-10.

[30] CHOO Y X, TEH L K, TAN C X. Effects of sonication and thermal pasteurization on the nutritional, antioxidant, and microbial properties of noni juice [J]. Molecules, 2022, 28(1): 0313.

[31] ZAIDUL I, NORULAINI N N, OMAR M A, et al. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(4): 784-791.

[32] HESARINEJAD A M, KOOCHEKI A, RAZAVI A M S. Dynamic rheological properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum: Effect of concentration, temperature and heating/cooling rate [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 583-589.

[33] ZHU Y W, ZHOU X R, CHEN Y P, et al. Exploring the relationships between perceived umami intensity, umami components and electronic tongue responses in food matrices [J]. Food Chemistry, 2021, 368: 130849.